

Modeli predviđanja toplinske ugodnosti prostora

Igor WOLF

Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci (Faculty of Engineering, University of Rijeka)
Vukovarska 58, HR - 51000 Rijeka,
Republic of Croatia

igor.wolf@riteh.hr

Ključne riječi

*Modeli prilagođavanja
Toplinska ravnoteža
Toplinska ugodnost*

Keywords

*Adaptive models
Heat balance
Thermal comfort*

Received (primljeno): 2009-03-15

Accepted (prihvaćeno): 2009-08-31

Pregledni članak

Potrošnja energije za grijanje i hlađenje zgrada ovisi o projektnim vrijednostima parametara toplinske ugodnosti zatvorena prostora, koje međunarodne norme propisuju na temelju rezultata modela toplinske ravnoteže čovjekova tijela i okoliša. Ti modeli proizvod su intenzivnih laboratorijskih istraživanja. Terenska istraživanja ukazala su na manjkavosti laboratorijskoga pristupa, koje naročito dolaze do izražaja kod prirodno provjetravanj zgrada. Temeljeni rezultati terenskih mjerenja definirani su postulati modela prilagođavanja, koji sve značajnije utječu na određivanje optimalnih boravišnih uvjeta prema međunarodnim normama. U radu je dan pregled osnovnih značajki obaju pristupa problematici toplinske ugodnosti prostora.

Thermal Comfort Models

Subject review

Energy demand for heating and air-conditioning of building depends on target values of indoor thermal environmental parameters, which are prescribed by international standards based on heat balance models of the human body. The heat balance models have been derived from extensive experiments in laboratory climate chambers. Field studies have indicated drawbacks of that approach, especially in the case of naturally ventilated buildings. Based on field experiments, the adaptive approach to modelling thermal comfort has been developed, which has bigger and bigger influence on determination of optimal thermal environmental parameters in international standards. In this paper, a review of the basic characteristics of both approaches has been given.

1. Uvod

Energetska učinkovitost u zgradarstvu prepoznata je u današnje vrijeme kao područje koje ima najveći potencijal smanjenja potrošnje energije. Utrošena energija u stambenim i nestambenim zgradama čini više od 40 % ukupne potrošnje finalne energije u Hrvatskoj [1]. Na sličan podatak može se naići i u zemljama članicama Europske unije. Spoznaja o velikoj potrošnji energije i prepoznati potencijal energetske uštede i smanjenja onečišćenja okoliša potakli su donošenje niza direktiva i poticajnih mehanizama s ciljem povećanja energetske učinkovitosti u zgradarstvu.

Najznačajniji udio energetske potrošnje u zgradama pripada potrošnji namijenjenoj grijanju, kondicioniranju zraka i pripremi potrošne tople vode. Potrošnja energije za grijanje i hlađenje, te za kondicioniranje zraka, uvelike

ovisi o projektnim vrijednostima ključnih parametara toplinske ugodnosti prostora. Propisivanje mjera smanjenja potrošnje energije mora uvažavati potrebe korisnika zgrade i zadovoljiti kriterije kvalitete zatvorena prostora. Provedena istraživanja su pokazala da troškovi koji nastaju kao posljedica nepovoljnih mikroklimatskih obilježja prostora (zdravstvene tegobe, neproduktivnost) često uvelike premašuju troškove utrošene energije u zgradi [2]. Osim toga, nezadovoljavajuće stanje prostora vrlo vjerojatno će potaknuti reakcije korisnika usmjerene ka podizanju razine ugodnosti, što može dovesti do povećanja potrošnje energije. Stoga je potrebno definirati projektne vrijednosti ključnih parametara toplinske ugodnosti na način da se osiguraju optimalni boravišni uvjeti u zgradi, kako s gledišta ugodnosti, tako i s gledišta racionalnog gospodarenja energijom.

Na temelju smjernica danih Direktivom 2002/91/EC Europskoga parlamenta i Vijeća Europske unije o energetskej učinkovitosti zgrada [3], Europski odbor za normizaciju (engl. European Committee for Standardisation, CEN) usvojio je 2007. g. normu EN 15251 [2,4]. Između ostalog, ona propisuje projektne parametre termotehničkih sustava grijanja, hlađenja i klimatizacije, te definira metode vrednovanja ostvarene kvalitete unutrašnjega okoliša. Norma EN 15251 prvi put uvodi različite projektne kriterije za ljetni period za klimatizirane i neklimatizirane zgrade. U zgradama bez klimatizacijskoga sustava, a s visokom razinom kontrole stanja okoliša od strane samih korisnika, dopušta se primjena modela prilagođavanja. Dosadašnje norme koje propisuju toplinsku ugodnost prostora isključivo su se temeljile na primjeni modela toplinske ravnoteže čovjekova tijela i okoliša, koji su produkt laboratorijskih istraživanja. Međutim, rezultati provedenih terenskih mjerenja ukazali su na nedostatke toga pristupa, te sve značajnije upućuju na potrebu uvažavanja rezultata modela prilagođavanja.

U ovome radu je dan pregled osnovnih značajki laboratorijskoga (modeli toplinske ravnoteže) i terenskoga (modeli prilagođavanja) pristupa problematici toplinske ugodnosti prostora.

2. Toplinska ugodnost

Američko društvo inženjera sustava grijanja, hlađenja i klimatizacije (engl. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE) i Međunarodna organizacija za normizaciju (engl. International Organization for Standardization, ISO) u svojim normama ASHRAE 55 [5] i ISO 7730 [6,7] definiraju toplinsku ugodnost kao "stanje svijesti koje izražava zadovoljstvo toplinskim obilježjima prostora". Definicija je to koja jednoj praktičnoj grani ljudske djelatnosti poput strojarstva ne znači mnogo. Temeljem navedene definicije teško se toplinska ugodnost može iskazati inženjerskoj struci svojstvenim matematičkim izrazima i konkretnim brojčanim vrijednostima. Ona, dapače, ukazuje na to da se ovdje radi o problematici koja u suštini pripada jednoj drugoj grani ljudske djelatnosti - psihologiji. Stoga je jasna nezahvalnost položaja projektanta termotehničkih instalacija, čiji je cilj osigurati mikroklimatska obilježja prostora koja će njegovi korisnici smatrati ugodnim za boravak. S fiziološkog gledišta, pojam idealne toplinske ugodnosti može se, prema Benzingeru [8], objasniti kao ono stanje odnosa čovjeka i okoliša, pri kojem čovjekov termoregulacijski sustav, zadužen za održavanje stalne temperature tijela, nema potrebe ni za kakvom obrambenom reakcijom. Tada se čovjek nalazi u neutralnome stanju toplinske ravnoteže s okolišem.

Sud o ugodnosti proizvod je spoznajna procesa koji uključuje fizikalne, fiziološke, psihološke i druge momente [5]. Subjektivnost doživljaja toplinskoga stanja prostora od strane njegovih korisnika, te individualnost očekivanja kvalitete okoliša, nalažu da se odmah naglasi kako cilj projektiranja termotehničkih sustava grijanja, hlađenja i klimatizacije nije zadovoljavanje potreba i očekivanja svih korisnika određena prostora, već maksimalne moguće većine njih. Međunarodnim normama ASHRAE 55 i EN ISO 7730 definirane su projektne vrijednosti ključnih parametara toplinske ugodnosti, koje ciljaju na zadovoljavanje potreba i očekivanja barem 80 % ukupnoga broja u prostoru prisutnih osoba [4-7].

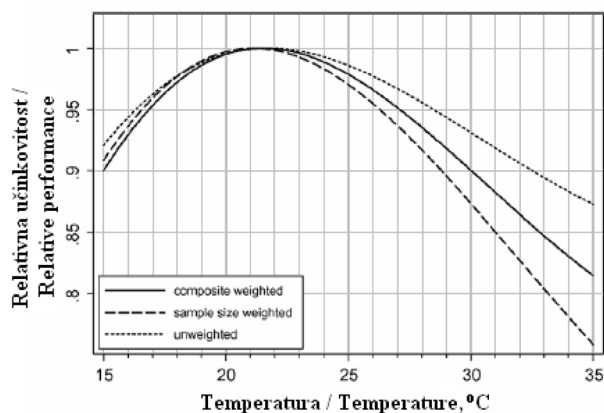
Zašto je tako važno voditi računa o razini ugodnosti prostora u kojemu se boravi, iako bi netko mogao reći da je ovdje riječ o problematici koja je, barem na neki način, stvar luksuza? Prvo i osnovno, radi se o potrebi čovjeka da se osjeća ugodno. Ugodan ambijent izaziva dobro raspoloženje, zadovoljstvo, a takvo psihološko stanje čovjeka rezultira općim dobrim zdravstvenim stanjem, te predstavlja poticaj izvršavanju radnih obveza. U svome domu čovjek sam kreira i kontrolira mikroklimatska obilježja prostora u kojem spava, jede, provodi slobodno vrijeme. On to čini ovisno o svojim potrebama i očekivanjima, stečenome iskustvu o djelovanju loših boravišnih uvjeta na vlastitu ugodnost, zadovoljstvo i zdravlje, te ekonomskim mogućnostima i raspoloživoj energiji. Međutim, utjecaj toplinskih obilježja na učinkovitost izvršavanja radnih obveza nije samo briga pojedinca - zaposlenika, već i poslodavca, a i društva u cjelini. Moderna društva temelje se na zakonitostima tržišne ekonomije, gdje su od presudne važnosti visoka produktivnost i učinkovitost rada, te isplativost poslovanja. Kosonen [9] navodi procjenu više studija provedenih u SAD-u da bi godišnja potencijalna dobit uslijed povećanja produktivnosti postignutog smanjenjem broja respiratornih infekcija mogla iznositi od 6 do 14 milijardi dolara, dok bi smanjenje tegoba izazvanih sindromom bolesnih zgrada¹ (engl. Sick Building Syndrome, SBS) moglo donijeti od 15 do 38 milijardi dolara. Porast radne učinkovitosti mogao bi, pak, donijeti od 20 do 200 milijardi dolara. Seppänen su vlastita istraživanja dovela do podatka da loši boravišni uvjeti u Finskoj uzrokuju gubitke u visini od 2,7 milijarde eura [9]. Zbog svega navedenog, ne čudi interes za istraživanjima posvećenima utvrđivanju međuovisnosti ugodnosti boravka u zatvorenome prostoru i čovjekove

¹ Pojam kojim se opisuju situacije kada korisnici zgrada doživljavaju akutne zdravstvene probleme za koje se čini da bi mogli biti povezani s boravkom u zgradi. Korisnici prostora se žale na simptome poput glavobolje; iritacije očiju, nosa ili grla; suhog kašlja; suhe i svrbljive kože; vrtoglavice i mučnine; poteškoća u koncentraciji; umora; te osjetljivosti na mirise. Uzrok pojave simptoma nije poznat, a većina nezadovoljnih nema više problema ubrzo nakon napuštanja zgrade. Uzrok SBS-a može biti neodgovarajuća ventilacija, te razni kemijski i biološki zagađivači [13].

sposobnosti izvršavanja radnih obveza. Ta su istraživanja pokazala da su ljudske intelektualne, radne i opažajne sposobnosti najizraženije upravo prilikom boravka u ugodnome okolišu [9-12].

Wyon [10] opravdava potrebu za grijanjem i hlađenjem prostora uzimajući za primjer nisku razinu spretnosti izvršavanja zadataka u uvjetima kada nedovoljno grijanje prostora uzrokuje pothlađivanje ekstremiteta, dok s druge strane pretopao okoliš izaziva letargiju i glavobolju, te ima negativne posljedice po čovjekove mentalne sposobnosti i brzinu obavljanja zadataka. Glede opravdanosti primjene ventilacijskih sustava, Wyon je nakon pregleda rezultata niza terenskih i laboratorijskih istraživanja zaključio da slaba kvaliteta zraka u zgradama umanjuje produktivnost (učinkovitost obavljanja većine uredskih poslova smanjuje se za 6–9 %), te uzrokuje nezadovoljstvo kod posjetitelja (stalni korisnici prostora se nakon izvjesna vremena prilagode kvaliteti unutrašnjega zraka nesvjesni njegova nezadovoljavajućega stanja).

Seppänen i Fisk su različitim metodama osrednjivanja rezultata istraživanja prikupljenih iz literature utvrdili funkcijsku ovisnost radne učinkovitosti o temperaturi prostora (slika 1) [6]. Ti rezultati se odnose na učinkovitost ljudi koji se bave lakšom fizičkom aktivnošću, a odjeveni su u uobičajenu kućnu odjeću.



Slika 1. Promjena radne učinkovitosti u ovisnosti o temperaturi prostora [6]

Figure 1. Relative performance versus temperature

Wyonova istraživanja [9] su pokazala da smanjenje učinkovitosti ovisi o vrsti posla. Ispitujući smanjenje radne učinkovitosti prilikom tipkanja i misaonih zadataka, Wyon je utvrdio 30 %-tno smanjenje učinkovitosti rješavanja misaonih problema pri temperaturama višim od 27 °C, u odnosu na učinkovitost pri početnoj neutralnoj temperaturi od 21 °C. U slučaju različitih vježbi pretipkavanja teksta, učinkovitost je pala na 70 % tijekom porasta temperature zraka za 4 °C (od 21 na 25 °C) i zadržala se na toj razini pri višim temperaturama.

Iako u suštini problematika toplinske ugodnosti prostora pripada disciplini ekološke psihologije, iskustva primjene sustava grijanja, hlađenja i klimatizacije, te popratna istraživanja koja su temelj razvoja i usavršavanja tih sustava, pokazuju da su se njome prvenstveno bavili znanstvenici i stručnjaci s područja tehničkih znanosti. de Dear [14] to objašnjava činjenicom da je inženjerski pristup na vrlo pragmatičan način zadovoljio potrebe onih koji se praktično bave problematikom toplinske ugodnosti, prije svega projektanate termotehničkih instalacija. Jedan od najznačajnijih predstavnika inženjerskoga pristupa jest danski znanstvenik P. O. Fanger, čija je klasična psihofizikalna metodologija istraživanja ovoga složenoga problema rezultirala u praksi vrlo primjenjivim matematičkim modelom toplinske ugodnosti prostora. Njegovim tzv. PMV - PPD modelom [15] uspješno je brojčano iskazana veza toplinskoga stanja prostora i subjektivne reakcije na nj.

3. Istraživanja parametara toplinske ugodnosti prostora

Osnovni cilj primjene termotehničkih sustava grijanja, hlađenja i klimatizacije jest stvoriti takva mikroklimatska obilježja prostora koja će kod njegovih korisnika izazvati osjećaj ugone. Budući da dosegnuta razina tehnološkoga razvitka tih sustava omogućuje postizanje praktički bilo kakva toplinskoga stanja, potrebno je poznavati projektne vrijednosti onih parametara koji imaju odlučujuću ulogu u definiranju toplinske ugodnosti prostora, a na kojima se može temeljiti inženjerska praksa projektiranja i razvoja elemenata sustava grijanja, hlađenja i klimatizacije. Dakle, njihova praktična primjena zahtijeva da se [14]:

- odrede ključni parametri toplinske ugodnosti,
- kvantificira njihov utjecaj na korisnika prostora, te
- utvrdi utjecaj zgrade i sustava grijanja, hlađenja i klimatizacije na te ključne parametre.

Istraživanja provedena u posljednjih stotinjak godina, koja su imala za cilj dati odgovore na navedene zahtjeve, poslužila su kao podloga za razvoj međunarodnih normi. Namjena tih normi je usmjeriti projektanta k odabiru onog projektnog rješenja koje će u konkretnom slučaju omogućiti postizanje optimalne toplinske ugodnosti. Analizirajući metodologiju istraživanja toplinske ugodnosti, dolazi se do zaključka da postoje dva jasno uočljiva pristupa, koji se načelno razlikuju u pogledu na suštinu odnosa čovjeka i zatvorena prostora.

Prvi pristup istraživanjima toplinske ugodnosti prostora temelji se na pokusnim mjerenjima u laboratorijima. U strogo kontroliranim i vremenski ustaljenim uvjetima, njima su utvrđene postavke modela toplinske ravnoteže čovjekova tijela i okoliša. Osjećaj zadovoljstva toplinskim stanjem prostora smatra se unaprijed određenim fizikalno - fiziološkim zakonitostima

reakcije tijela na toplinske podražaje kojima je izloženo. Ovaj pristup čovjeka promatra kao pasivna promatrača toplinskoga stanja prostora, a odgovornost osiguranja preduvjeta ugodnosti boravka u njemu leži isključivo na ugrađenom sustavu grijanja, hlađenja i klimatizacije.

Drugi pristup, pristup prilagođavanja, daje čovjeku bitno aktivniju ulogu u procesu stvaranja toplinski ugodna prostora. Prema tom pristupu, čovjek u svakom trenutku koristi sva raspoloživa sredstva kako bi se prilagodio toplinskome stanju prostora ili kako bi stanje prostora uskladio sa svojim potrebama i očekivanjima. Teorija pristupa prilagođavanja razlikuje fiziološko i psihološko prilagođavanje, te prilagodbu ponašanja (bihevioralna prilagodba). Ti se modeli temelje na rezultatima brojnih terenskih istraživanja.

3.1. Modeli toplinske ravnoteže

Osnovna pretpostavka laboratorijskoga pristupa istraživanjima toplinske ugodnosti prostora jest da je ugodnost ovisna o mogućnostima postizanja toplinske ravnoteže tijela i okoliša. S ciljem razvijanja modela toplinske ravnoteže, koji su osnova razvoja metoda vrednovanja kvalitete okoliša, proučavane su toplinske, fiziološke i psihološke reakcije ispitanika u različitim nametnutim situacijama. Laboratorijska istraživanja parametara toplinske ugodnosti provode se u posebnim ispitnim komorama, tzv. model – prostorima. U njima se simuliraju mikroklimatska obilježja realnoga prostora, sa stvarnim unutrašnjim i vanjskim toplinskim izvorima i ponorima. Model – prostor je obično opremljen automatski reguliranim termotehničkim sustavom kojim se postižu i održavaju, testrogo kontroliraju, oni mikroklimatski uvjeti čiji se utjecaj želi istražiti. U prostoru borave ispitanici – dobrovoljci, koji ispunjavaju unaprijed pripremljene upitnike i ocjenjuju nametnute toplinske podražaje. Istovremeno se odgovarajućim sustavom prikupljanja podataka mjere i bilježe svi relevantni parametri okoliša (temperature, relativna vlažnost, brzine strujanja zraka, i dr.). Ocjenjivanje toplinskoga stanja prostora započinje nakon dovoljno duga perioda aklimatizacije, tj. onda kada se može očekivati da su ispitanici postigli toplinsku ravnotežu s okolišem. Iako su u prošlosti korištene i druge psihofizikalne ljestvice osjećaja topline, uvriježilo se prosječno vrednovanje toplinske ugodnosti prostora vršiti u skladu s ASHRAE-ovom sedmerostupanjskom

ljestvicom [5]. Razina osjećaja topline tom je ljestvicom podijeljena na vrijednosti od -3 do +3, pri čemu je podjela simetrična u odnosu na nulu. Nulta razina predstavlja toplinski neutralno, ravnotežno stanje tijela (tablica 1).

Neki od predstavnika laboratorijskoga pristupa istraživanju parametara toplinske ugodnosti prostora su Fanger, Gagge, Jaax, McNall, Nevins, Rohles, Wallis [16]. Sudionici tih istraživanja uglavnom su bili studenti podrijetlom iz zemalja s područja umjerena klimatskog pojasa (Sjeverna Amerika, Europa). Primjenom ovoga pristupa, istraživači (Fanger) su izdvojili ključne parametre toplinske ugodnosti prostora, koji svojim kombiniranim djelovanjem utječu na opažaj njegova toplinskoga stanja. Ti su parametri podijeljeni u dvije skupine. Prvu skupinu čine parametri koji određuju toplinsko stanje prostora: temperatura zraka, prosječna temperatura zračenja obuhvatnih ploha prostora, relativna vlažnost i brzina strujanja zraka. U drugu skupinu, skupinu parametara koji opisuju osobu, uvršteni su fizička aktivnost (metabolička proizvodnja topline u tijelu), te razina odjevenosti osobe (toplinska izoliranost odjećom). Kao dodatni parametar, ponegdje se navodi i vremenska izloženost toplinskim podražajima okoliša [16]. Kombiniranjem parametara mogu se kreirati indeksi ili modeli toplinske ugodnosti, koji omogućuju kvantificiranje i predviđanje neugode koju proživljavaju korisnici promatrana prostora.

Svaki model toplinske ravnoteže mora na neki način procijeniti izmjenu topline i tvari između čovjeka i okoliša, te odrediti (ne)ravnotežu između proizvedene i izmijenjene topline, ili u vremenski ustaljenim ili u promjenjivim uvjetima [17]. Osim toga, svaki model mora povezati toplinske opažaje s fiziološkim reakcijama organizma. Prvi modeli toplinske ravnoteže, izrađeni za potrebe vojne i aeronautičke industrije, pojavili su se u uporabi prije 30-ak godina. Bile su to jednostavne, jednodimenzijske, vremenski ustaljene simulacije reakcija čovjekova termoregulacijskog sustava i njegova međudjelovanja s okolišem. Kasnije su razvijeni složeni vremenski promjenjivi numerički modeli, koji čovjekovo tijelo dijele u tisuće konačnih elemenata [17-19]. Svi ti modeli imaju ograničenu preciznost opisa fizikalne stvarnosti i točnost ulaznih, izmjenjenih ili procijenjenih, podataka.

Fangerov model je najpoznatiji proizvod laboratorijskog pristupa istraživanjima toplinske ugodnosti prostora. Izvorno je razvijen s ciljem vrednovanja toplinske

Tablica 1. ASHRAE-ova ljestvica osjećaja topline [5]

Table 1. ASHRAE thermal sensation scale

-3	-2	-1	0	1	2	3
ledeno / cold	hladno / cool	prohladno / slightly cool	neutralno / neutral	toplo / slightly warm	jako toplo / warm	vruće / hot

ugodnosti uredskih prostora, a zbog jednostavnosti je prihvaćen i koristi se za potrebe projektiranja i terenskih analiza ugodnosti. U nastavku je dan kratak prikaz Fangerova modela.

PMV – PPD model

Prema Fangeru, postoje tri osnovna uvjeta optimalne toplinske ugodnosti [15].

Prvi uvjet je postojanje toplinske ravnoteže između osobe i okoliša. U stanju toplinske ravnoteže, koja se uspostavlja pri duljoj izloženosti tijela ustaljenim i umjerenim mikroklimatskim obilježjima prostora, proizvedena toplina u tijelu umanjena za eventualno obavljani vanjski mehanički rad jednaka je količini topline koja se predaje okolišu. Zadovoljenje ove jednadžbe toplinske ravnoteže nije, međutim, i dovoljan uvjet. Laboratorijska istraživanja su pokazala da unutar širokoga područja vrijednosti okolišnih parametara koje zadovoljavaju tu jednadžbu, samo neke njihove vrijednosti jamče toplinsku ugodnost. Fanger je utvrdio da su za osjećaj toplinske ugone važni prosječna temperatura kože i količina izlučena znoja, za koje je zaključio da su jedini fiziološki parametri koji utječu na toplinsku ravnotežu tijela i okoliša. Kako je područje vrijednosti parametara okoliša koje udovoljavaju zahtjevima ugodnosti usko, tako je i interval vrijednosti tih dvaju fizioloških parametara u stanju ugodnosti uzak. Intervali vrijednosti se razlikuju od osobe do osobe, a ovisni su o razini njihove fizičke aktivnosti. Kako bi odredio ovisnost prosječne temperature kože i količine izlučena znoja u stanju ugone o razini fizičke aktivnosti, Fanger je izvršio pokusna mjerenja i izveo linearne regresijske izraze za proračun njihovih vrijednosti. Ta dva izraza predstavljaju drugi i treći osnovni uvjet optimalne toplinske ugodnosti.

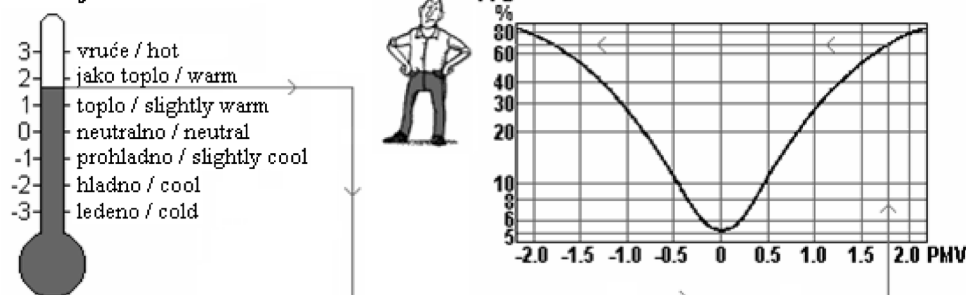
Fangerova istraživanja rezultirala su općom jednadžbom toplinske ugodnosti, koja sadrži sve ranije navedene okolišne i osobne parametre, a omogućuje određivanje onih kombinacija tih parametara koje osiguravaju optimalnu toplinsku ugodnost u ustaljenim uvjetima. Ta jednadžba, koja objedinjava sva tri osnovna uvjeta ugodnosti, temelj je odabira, analize i optimizacije

rada termotehničkoga sustava koji tu ugodnost svojim djelovanjem mora i ostvariti. Međutim, ona samo daje informaciju o tome kako valja iskombinirati ključne parametare ne bi li se postigla toplinska ugodnost, ali se ne može upotrijebiti za vrednovanje zatečena stanja u nekom određenome prostoru.

Općenito govoreći, teško je očekivati da su zatečeni parametri okoliša upravo takvi da zadovoljavaju jednadžbu ugodnosti. U tom općenitom slučaju izostaje toplinska ravnoteža čovjekova tijela s okolišem. Tada je tijelo izloženo fiziološkom naporu aktiviranja mehanizama regulacije tjelesne temperature, s ciljem ponovna postizanja narušene ravnoteže. Fanger je pretpostavio da je osjećaj topline pri danoj razini fizičke aktivnosti povezan s tim naporom. Da bi pronašao poveznicu između osjećaja topline i parametara okoliša, Fanger je proširio jednadžbu toplinske ugodnosti uključivši toplinske opažaje gotovo 1 400 ispitanika, prikupljene tijekom pokusnih mjerenja u ustaljenom, dobro kontroliranom laboratorijskom okolišu. Na temelju opće jednadžbe toplinske ugodnosti, Fanger je definirao indeks predvidljiva prosječna vrednovanja ugodnosti (engl. Predicted Mean Vote, PMV), koji u osnovi predstavlja razliku između proizvedene topline u tijelu i količine topline koja se izmjenjuje s okolišem. Njime je statistički povezana fiziološka reakcija termoregulacijskoga sustava s vrednovanjem osjećaja topline. Svaki višak proizvedene topline uzrokuje pojavu osjećaja topline, a manjak pojavu osjećaja hladnoće. PMV indeks predviđa prosječno vrednovanje toplinske ugodnosti od strane skupine ljudi koji borave u promatranom prostoru, u skladu s ASHRAE-ovom ljestvicom osjećaja topline. Predviđanje prosječna vrednovanja vrši se na temelju izmjerenih vrijednosti parametara okoliša, te procijenjene razine fizičke aktivnosti i toplinske izoliranosti tijela odjećom.

Rezultati vlastitih pokusnih mjerenja, kao i oni Nevinsa i Rohlesa (ukupno oko 1 300 osoba), poslužili su Fangeru da utvrdi funkcijsku ovisnost postotka ljudi nedvojbeno nezadovoljnih toplinskim stanjem okoliša i vrijednosti PMV indeksa. Na temelju utvrđene funkcijske ovisnosti, Fanger je definirao indeks predvidljiva postotka osoba nezadovoljnih stanjem prostora (engl. Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD). Pritom je nedvojbeno

PMV ljestvica / PMV scale



Slika 2. Predvidljivi postotak nezadovoljnih (PPD) u funkciji predvidljiva prosječnog vrednovanja (PMV) [22]

Figure 2. Predicted percentage of dissatisfied (PPD) as a function of predicted mean vote (PMV)

nezadovoljnima proglasio one ispitanike koji su razinu toplinske ugone vrednovali ocjenom -2, -3, 2 ili 3. To je učinio oslanjajući se na prethodna Gageova istraživanja, koja su pokazala da realnu neugodu prvi izražavaju ljudi koji daju upravo te ocjene. Funkcijska ovisnost postotka nezadovoljnih o PMV indeksu ima minimalnu vrijednost 5 % (slika 2). Time je potvrđena nemogućnost zadovoljavanja potreba i očekivanja svih osoba unutar skupine ljudi koji dijele promatrani okoliš.

Glavni problemi primjene Fangerova modela [20] ogledaju se u činjenici da se kvaliteta rezultata modela temelji na točnosti procjene izoliranosti tijela odjećom (stvarni toplinski otpor odjeće može se razlikovati od laboratorijski izmjerenih vrijednosti korištenjem lutki), kao i razine aktivnosti osobe. U mnogim slučajevima ne uzima se u obzir činjenica da je osoba koja sjedi ili leži dodatno toplinski izolirana. Proizvodnja topline u tijelu vrlo je često promjenjiva, a može ovisiti i o trenutnim psihološkim stanjima (stres, elan). Kvaliteta rezultata modela ovisi i o točnosti terenskih mjerenja fizikalnih veličina, pri čemu mjerenja moraju biti izvršena i vremenski i prostorno u skladu s korištenjem prostora. To je naročito važno u prostorima s nejednoličnim ili vremenski promjenjivim uvjetima kakvi vladaju u zgradama s prirodnim provjetravanjem.

Sumirajući rezultate Humphreysova i Nicolova opsežna testiranja PMV – PPD modela [21], može se zaključiti da model daje najtočnija predviđanja vrednovanja toplinske ugodnosti prostora kada je raspon vrijednosti toplinskoga otpora odjeće između 0,3 i 1,2 clo ($1\text{ clo} = 0,155\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$), metabolički učinak manji od 1,4 met ($1\text{ met} = 58,2\text{ W}/\text{m}^2$), osjetna temperatura niža od 27 °C, brzine strujanja zraka manje od 0,2 m/s, a relativna vlažnost zraka ne prelazi 60 %.

3.2. Modeli prilagođavanja

Unatoč dosljednosti i usporedivosti rezultata mjerenja u raznim model – prostorima širom svijeta, te njihovu slaganju s teorijskim modelima zasnovanim na toplinskoj ravnoteži tijela i okoliša, kod određena broja istraživača pojavila se sumnja u ispravnost laboratorijskoga pristupa. Naime, postavlja se pitanje koliko su rezultati laboratorijskih mjerenja valjani, promatrajući ih iz perspektive realnih životnih situacija. Može li se smatrati da osoba prilikom boravka u laboratoriju, u kojem je podvrgnuta djelovanju određenih toplinskih podražaja i odjevena u tipsku laboratorijsku odjeću, reagira na jednak način kao i u situaciji kada se nalazi u uobičajenom kontekstu svoga doma, radnoga mjesta ili nekog drugog realnog životnog prostora [14]? U laboratorijskim uvjetima ispitanici su lišeni mogućnosti prilagodbe toplinskome stanju okoliša poput ljudi u svakodnevnom životu. Za razliku od laboratorijskih, terenska mjerenja

omogućuju istraživanja toplinskih opažaja ljudi u njihovim uobičajenim boravišnim uvjetima. Pobornici pristupa terenskih istraživanja (Auliciems, Brager, de Dear, Fishman, Humphreys, Nicol, Pimbert, Schiller i dr.) smatraju da su tako dobiveni rezultati precizniji, da bolje odražavaju stvarno stanje stvari, te da je uzorak ispitanika, koji i inače borave u promatranoj zgradi, puno veći i reprezentativniji no u slučaju laboratorijskih istraživanja. Njihov pristup istraživanjima parametara toplinske ugodnosti rezultirao je razvojem teorije prilagođavanja, vjerovanjem da su ljudi sposobni iskoristiti sva raspoloživa sredstva kako bi prilagoditi sebe, svoje želje, očekivanja i ponašanje promjenama stanja okoliša, pod uvjetom da te promjene nisu ekstremne, te da imaju dovoljno vremena za prilagodbu.

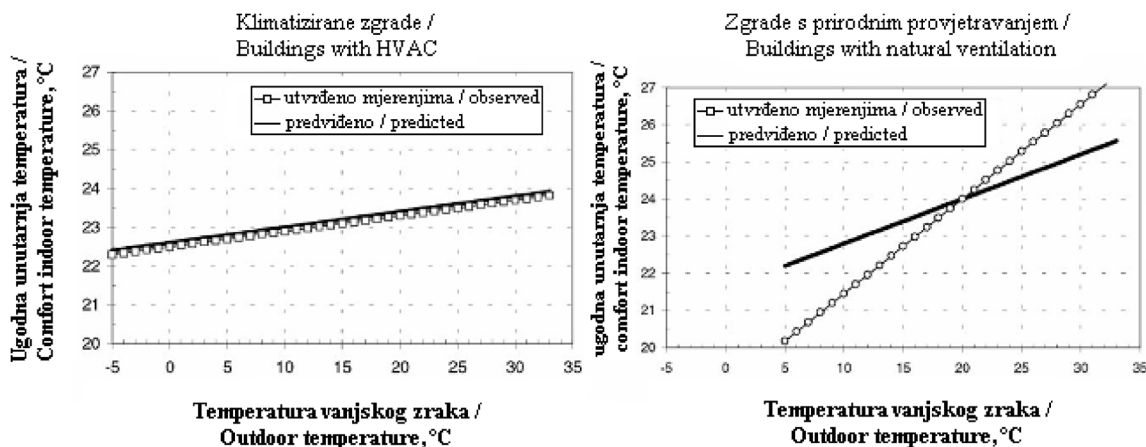
Interes za istraživanjima postulata teorije prilagođavanja pojavio se sredinom 70-ih godina 20. stoljeća pod utjecajem naftne krize, a snažniji zamah ova teorija je dobila u zadnjih petnaestak godina uslijed pojačane svijesti o klimatskim promjenama izazvanim djelovanjem čovjeka. ASHRAE je sredinom 1980-ih započeo financirati izradu terenskih studija o toplinskoj ugodnosti [20], kako bi se ispitala valjanost rezultata laboratorijskih istraživanja u različitim klimatskim uvjetima diljem svijeta. Tijekom terenskih pregleda zgrada, istraživači prikupljaju podatke o mikroklimatskim obilježjima pojedinih prostorija, te istovremene reakcije ispitanika koji u njima provode svoju svakodnevnicu. Reakcije ispitanika na toplinske podražaje prate se putem upitnika, koji sadrže pitanja vezana uz vrednovanje trenutne toplinske ugone. Potom se prikupljeni rezultati statistički obrađuju, s ciljem određivanja temperatura ili kombinacije okolišnih parametara (temperatura, relativna vlažnost, brzina strujanja zraka) koje ispitanici smatraju neutralnim ili ugodnim [23]. Tako utvrđeni optimalni uvjeti mogu se smatrati prihvatljivima u svim zgradama sa sličnim mikroklimatskim obilježjima.

Glavna mana terenskih istraživanja, pored točnosti mjerenja okolišnih parametara koji mogu biti vrlo promjenjivi u realnim uvjetima, jest upitnost donošenja općenitih zaključaka na temelju pojedinačnih ispitivanja. Rezultati pojedina terenskog istraživanja mogu jednostavno opisivati samo zatečene uvjete u trenutku izvođenja mjerenja. S ciljem prevladavanja toga nedostatka predloženo je tzv. načelo prilagodbe, koje glasi: ukoliko dođe do promjene toplinskoga stanja okoliša, takve da izazove neugodu, ljudi pokušavaju povratiti narušenu ugodnost [23]. U skladu s tim načelom, generaliziranje zaključaka zasnovanih na pojedinačnim terenskim istraživanjima moguće je izvršiti primjenom meta – analiza [24, 25]. One povezuju rezultate mnogih pojedinačnih istraživanja s ciljem pronalaženja obrazaca ponašanja i reagiranja ljudi prilikom promjena toplinskoga stanja prostora.

Jedna od najznačajnijih takvih meta – analiza jest ona pod oznakom ASHRAE RP-884 [24], čiji je zadatak bio ispitati uočenu razliku u reakcijama ljudi na toplinske podražaje u klimatiziranim i prirodno provjetravanim zgradama. U sklopu te studije, de Dear i Brager su prikupili i obradili rezultate desetak terenskih istraživanja, te stvorili bazu podataka s oko 160 različitih, uglavnom komercijalnih zgrada, te s ukupno oko 22 000 ispitanika. Istraživanja koja čine tu bazu podataka provedena su širom svijeta, na četirima kontinentima, a obuhvaćaju pustinska područja, umjereni klimatski pojas, te tropske krajeve. Sadržani podaci uključuju odgovore na pitanja vezana uz opažaj toplinskoga stanja prostora, procjenu razine odjevenosti i metaboličkoga učinka ispitanika, rezultate popratnih mjerenja toplinskih parametara okoliša, izračune različitih indeksa, te meteorološke podatke o stanju vanjskoga zraka. Njihovo je istraživanje pokazalo dobru podudarnost rezultata terenskih istraživanja preferiranih unutrašnjih temperatura u zgradama sa središnjim klimatizacijskim sustavom i optimalnih temperatura proračunatih pomoću PMV – PPD modela (slika 3, lijevo). Istraživanjima je utvrđeno da su mikroklimatska obilježja prostora u takvim

temperaturnim promjenama nego što to proizlazi iz rezultata laboratorijskih mjerenja. Pokazalo se da prihvatljiva razina ugodnosti u stambenim i uredskim zgradama može biti postignuta unutar širokoga temperaturnog područja između 17 i 31 °C (Humphreys, [19]). Činjenica da su ljudi uspjeli postići ugodnost boravka unutar tako širokoga raspona temperatura, puno šireg od granica područja ugodnosti definiranih međunarodnim normama, tumači se pretpostavkom njihova prilagođavanja uvjetima okoliša.

Prilagođavanje se može definirati kao stupnjevano smanjenje reakcija organizma na ponavljajuće okolišne podražaje, a obuhvaća sve procese kojima korisnici pribjegavaju ne bi li uskladili stanje prostora u kojem borave sa svojim zahtjevima i očekivanjima. Ti procesi su prvenstveno bihevioralnog ili psihološkog tipa [20]. Bihevioralno prilagođavanje uključuje sve promjene koje osoba može svjesno ili nesvjesno izvršiti, a koje utječu na izmjenu topline i tvari između nje i okoliša. Ova vrsta prilagođavanja razlikuje osobnu (promjena razine odjevenosti, aktivnosti, stava, prehrane, kretanja), tehnološku (promjene u okolišu; otvaranje prozora, upravljanje sjenilima, ventilatorima, ogrjevnim tijelima,



Slika 3. Usporedba ugodnih temperatura prostora utvrđenih terenskim mjerenjima i predviđenih PMV – PPD modelom za klimatizirane (lijevo) i prirodno provjetravane (desno) zgrade [6]

Slika 3. A comparison of comfort temperatures determined by field surveys and predicted by PMV – PPD model for air-conditioned (left) and naturally ventilated (right) buildings

zgradama uglavnom vremenski ustaljena, a korisnici prostora u stanju toplinske ravnoteže s okolišem [14]. U tim uvjetima, sličnim onima u model – prostorima, laboratorijski se pristup pokazao uspješnim.

Podudarnost rezultata nije, međutim, zabilježena u slučaju zgrada s prirodnim provjetravanjem (slika 3, desno). Dapače, tu je uočena prilična razlika između temperatura koje su ispitanici smatrali prihvatljivima i optimalnih temperatura proračunatih Fangerovim modelom. Terenska istraživanja su utvrdila da su ljudi u mnogim realnim situacijama tolerantniji prema

blokiranje zračnih difuzora i slične aktivnosti ovisne o razini osobne kontrole koja stoji na raspolaganju korisnicima prostora i kulturološku prilagodbu (planiranje aktivnosti, odmora, pravila odijevanja). Bihevioralno prilagođavanje pruža čovjeku možda i najveću mogućnost odigravanja aktivne uloge u održavanju željene razine toplinske ugone. Psihološko prilagođavanje obuhvaća učinke spoznajnih i kulturoloških momenata i opisuje mjeru u kojoj navike i očekivanja mijenjaju reakcije na podražaje okoliša.

Izgradnja baze podataka ASHRAE RP-884 omogućila je proučavanje, razvoj i provjeru modela prilagođavanja, regresijskih izraza koji ne predviđaju reakcije ljudi na toplinske podražaje i njihovo vrednovanje toplinske ugodnosti, već daju informaciju o uvjetima (ugodna temperatura zraka) za koje se očekuje da mogu osigurati ugodan boravak u zgradi. Oni ne sadrže šest klasičnih parametara toplinske ugodnosti, budući da pobornici ovoga pristupa smatraju temperaturu vanjskoga zraka jedinim bitnim čimbenikom koji određuje optimalnu unutrašnju temperaturu [23]. Dva su razloga za to. Prvi razlog je taj što smatraju da trenutna meteorološka situacija i godišnje doba utječu na bihevioralnu prilagodbu, recimo na način da čovjek, ovisno o vremenu i nedavnom iskustvu, prilagođava razinu svoje odjevenosti. Drugi razlog uzima u obzir ukupno stečeno osobno iskustvo o djelovanju vremenskih prilika, što određuje psihološku prilagodbu u obliku očekivanoga stanja okoliša.

Modeli prilagođavanja su, dakle, regresijski izrazi koji opisuju funkcijsku ovisnost ugodne unutrašnje temperature o prosječnoj, uglavnom mjesečnoj, temperaturi vanjskoga zraka [19]. Ugodna ili neutralna temperatura jest osjetna temperatura prostora koja kod njegova korisnika izaziva neutralan toplinski osjećaj prema ASHRAE-ovoj ljestvici. Osjetna temperatura može se smatrati jednakom srednjoj vrijednosti temperature zraka i prosječne temperature zračenja obuhvatnih ploha prostora.

Pristup prilagođavanja prebacuje odgovornost za stvaranje toplinski ugodna prostora s termotehničkoga sustava na samoga korisnika. On mora biti aktivan, te iskoristiti sve mogućnosti prilagodbe koje mu stoje na raspolaganju kako bi si stvorio ugodno životno i radno okruženje. Korisnika prostora promatra se u kontekstu okoliša u kojem se trenutno nalazi. De Dear [14] navodi Oselandovo istraživanje iste skupine ljudi u različitim kontekstima (kuća, ured, laboratorij), koje je dalo bitno drukčije neutralne temperature, kako međusobno, tako i u odnosu na Fangerov model. De Dear [14] navodi Oselandovo istraživanje iste skupine ljudi u različitim kontekstima (kuća, ured, laboratorij), koje je dalo bitno drukčije neutralne temperature, kako međusobno, tako i u odnosu na Fangerov model. Ljudi koji žive u klimatiziranim prostorima razvili su visoka očekivanja i kritični su u slučaju odstupanja temperatura od normama propisanih projektnih vrijednosti. Korisnici prirodno provjetravanom zgrada navikli su na promjenjivost uvjeta, pa su im i očekivanja manja.

Fangerov model posjeduje određena obilježja pristupa prilagođavanja budući da uzima u obzir neke vidove bihevioralne prilagodbe (odjevenost korisnika, prilagodba aktivnosti, podešavanje brzine strujanja zraka). Suočen s rezultatima terenskih mjerenja, sa spoznajom da PMV – PPD model ne ostvaruje očekivanu točnost predviđanja optimalnih uvjeta boravka, pogotovo

u prirodno provjetravanom zgradama na toplijim klimatskim područjima, Fanger je prihvatio teoriju psihološkog prilagođavanja, te uveo tzv. faktor očekivanja [26]. Množenjem toga faktora s osnovnim izrazom za PMV indeks postigao je preciznije vrednovanje osjećaja topline kod korisnika prirodno provjetravanom zgradom. Vrijednosti faktora očekivanja u rasponu od 1,0 do 0,5 proračunao je iz međuovisnosti rezultata osnovnoga PMV – PPD modela i terenskih istraživanja sadržanih u ASHRAE-ovoj bazi podataka. Faktor očekivanja jednak jedinici odnosi se na područja s visokim očekivanjima korisnika i velikom koncentracijom klimatiziranih zgrada, dok se vrijednost 0,5 primjenjuje u slučajevima kada se na širem promatranom području nalazi mali broj klimatiziranih zgrada, a korisnici zgrada su navikli na više temperature prostora tijekom ljetnoga perioda.

4. Utjecaj modela na definiranje međunarodnih normi

Dosadašnje inačice međunarodnih normi ASHRAE 55 i EN ISO 7730, koje propisuju ciljne vrijednosti parametara toplinske ugodnosti pri projektiranju termotehničkih sustava grijanja, hlađenja i klimatizacije, koristile su isključivo saznanja prikupljena primjenom PMV – PPD modela. Načela teorije prilagođavanja prvi su put postala sastavnim dijelom norme ASHRAE 55 2004. godine [27], a od 2007. godine uključena su i u novu europsku normu EN 15251.

Norma EN 15251, čija su podloga norme EN ISO 7730, ASHRAE 55, CR 1752, te ASHRAE 62, razlikuje klimatizirane zgrade i zgrade bez mehaničkih sustava hlađenja. Kad su u pitanju klimatizirane zgrade, temelj uspostave kriterija toplinske ugodnosti bila je norma EN ISO 7730 iz 2005. godine. PMV – PPD modelom proračunate su ugodne osjetne temperature (tablica 2), posebno za zimski a posebno za ljetni period, za definirani tip odjeće (clo) i aktivnost osoba (met). Tom su normom prvi put uvedene kategorije kvalitete prostora, pri čemu kategorija A zadovoljava visoku, kategorija B prosječnu, a kategorija C umjerenu razinu očekivanja. Osjetna temperatura je za sve tri kategorije jednaka, ali je područje prihvatljivih temperatura različito, ovisno o toleriranom postotku nezadovoljnih. Odabir kategorije za određenu zgradu ovisi o tehničkim mogućnostima, ekonomskoj isplativosti, priželjkivanoj energetske učinkovitosti i sličnim čimbenicima, a odluku zajednički trebaju donijeti projektant termotehničkih instalacija i investitor.

Kriteriji koji, prema normi EN 15251, propisuju toplinsko stanje prostora u zgradama bez mehaničkih sustava hlađenja u ljetnome periodu definirani su u skladu s postulatima pristupa prilagođavanja. Ti se kriteriji temelje na rezultatima projekta Smart Control and Thermal Comfort (SCATs) [28-29], a prikazani su na slici

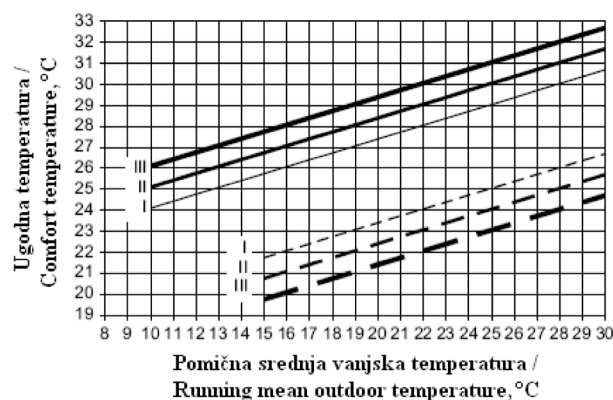
4. Pone linije na slici označavaju gornju, a isprekidane donju graničnu vrijednost propisana temperaturnog područja pojedine kategorije kvalitete prostora (tablica 3). Budući da se ne koriste za projektiranje klimatizacijskih sustava, propisane vrijednosti osjetnih temperatura u ljetnom periodu uglavnom se primjenjuju prilikom izrade arhitektonskog projekta zgrade, s ciljem odabira odgovarajućih rješenja kojima se sprječava pregrijavanje prostora (orijentacija zgrade, sjenila, akumulacijske sposobnosti ovojnice zgrade, prirodno provjetravanje).

Glavni cilj SCATs projekta bio je istražiti mogućnost primjene osnovnih načela teorije prilagodavanja u klimatiziranim zgradama, te smanjiti potrošnju energije u zgradi na način da se dopusti promjenjivost temperature prostora u ovisnosti o trenutnoj temperaturi vanjskoga zraka, korištenjem odgovarajućega regulacijskog algoritma [29]. U sklopu toga projekta izvršena su terenska mjerenja u pet europskih država (Francuska, Grčka, Portugal, Švedska, Velika Britanija), uglavnom u komercijalnim zgradama. Statističkom obradom rezultata

Tablica 2. Zahtijevane osjetne temperature za uredske prostore (relativna vlažnost ljeti 60 %, zimi 40 %) [6]

Table 2. Required operative temperatures for offices (relative humidity in summer 60 %, in winter 40 %) [6]

Kategorija kvalitete / Category	Zahtjevi ugodnosti / Requirements		Osjetna temperatura / operative temperature, °C	
	PPD	PMV	Zima / Winter 1,0 clo; 1,2 met	Ljeto / Summer 0,5 clo; 1,2 met
A	< 6%	-0,2<PMV<0,2	22,0 ± 1,0	24,5 ± 1,0
B	< 10%	-0,5<PMV<0,5	22,0 ± 2,0	24,5 ± 1,5
C	< 15%	-0,7<PMV<0,7	22,0 ± 3,0	24,5 ± 2,5



Slika 4. Projektne vrijednosti unutrašnje osjetne temperature za različite kategorije prirodno provjetranih zgrada prema EN15251 [28]

Figure 4. Design values for the indoor operative temperatures for different categories of naturally ventilated buildings after EN15251

mjerenja dobivena je ovisnost neutralnih temperatura o tzv. pomičnoj srednjoj vrijednosti temperature vanjskog zraka. Uporabom toga parametra, umjesto prosječne mjesečne temperature, naglasak se stavlja na prosječne temperature vanjskoga zraka tijekom prethodnih dana. Njihov utjecaj na proračunatu eksponencijalno osrednjenu prosječnu vanjsku temperaturu je veći od utjecaja prosječnih dnevnih temperatura zraka iz nekog ranijeg vremenskog perioda. Time se uvažava načelo prilagodbe koje kaže da na očekivane temperature prostora djeluju svježe stečena iskustva vezana uz toplinska obilježja kako unutarnjega, tako i vanjskog okoliša.

Na temelju rezultata SCATs projekta razvijen je algoritam regulacije temperature u zgradi, koji je definiran na način da je u ljetnom periodu unutrašnja temperatura ovisna o temperaturi vanjskoga zraka, dok se zimi održava stalna temperatura terenskim mjerenjima utvrđena kao neutralna (oko 22,5 °C). Ovaj pristup, koji dopušta

Tablica 3. Kategorije i prihvatljiva temperaturna područja za prirodno provjetravane zgrade [28]

Table 3. Different categories and associated acceptable temperature ranges for naturally ventilated buildings

Kategorija / Category	Objašnjenje / Explanation	Granice / Limits
I	Visoka razina očekivanja (za prostore koje koriste jako osjetljive osobe) / High level of expectation	±2 °C 10% PPD
II	Normalna razina očekivanja (nove i rekonstruirane zgrade) / Normal expectation	±3 °C 20% PPD
III	Umjerena očekivanja (postojeće zgrade) / A moderate expectation	±4 °C 35% PPD

promjenjivost (porast) temperature prostora u ljetnome periodu, trebao bi rezultirati željenim energetskim uštedama. Nameće se, međutim, pitanje kako će povišene temperature djelovati na produktivnost, te je li za takav pristup pomalo kasno, uzevši u obzir naviknutost ljudi, barem u razvijenim europskim državama, na dosadašnju praksu korištenja klimatizacijskih uređaja u poslovnim zgradama.

5. Zaključak

U radu su prikazane osnovne značajke laboratorijskoga i terenskoga pristupa istraživanjima toplinske ugodnosti prostora. Laboratorijski pristup je urodio modelima toplinske ravnoteže čovjekova tijela i okoliša, čijom su teorijskom razradom definirani ključni parametri toplinske ugodnosti. Ti se parametri dijele u dvije skupine. Jedni definiraju toplinsko stanje prostora, a drugi opisuju aktivnost i toplinsku izoliranost odjećom osobe koja u tom prostoru boravi. Najpoznatiji proizvod laboratorijskoga pristupa jest Fangerov PMV – PPD model, koji omogućuje proračun optimalne osjetne temperature za zadane ili procijenjene vrijednosti parametara toplinske ugodnosti, odnosno ocjenu zatečena stanja u nekom promatranom prostoru.

Pobornici terenskih mjerenja smatraju da se laboratorijskim istraživanjima narušava važna kontekstualna povezanost čovjeka i prostora u kojemu boravi, a koja određuje čovjekova očekivanja temeljena na prijašnjim iskustvima i stečenim navikama unutar promatrana konteksta. Stoga se, prema njima, jedino terenskim mjerenjima mogu realno utvrditi ona mikroklimatska obilježja prostora koja jamče ugodnost boravka. Čovjek pritom aktivno sudjeluje u kreiranju vlastite ugodnosti, koristeći sva raspoloživa sredstva prilagođavanja bilo sebe okolišnim uvjetima, bilo okolišnih uvjeta svojim potrebama i očekivanjima. Rezultati terenskih istraživanja poslužili su za razvoj modela prilagođavanja, koji proračun optimalne osjetne temperature vežu uz prosječnu temperaturu vanjskoga zraka. Prosječna temperatura vanjskoga zraka smatra se presudnim fizikalnim parametrom, koji utječe na odabir mjera bihevioralne prilagodbe i očekivanja vezana uz trenutna mikroklimatska obilježja prostora.

Međunarodne norme, koje propisuju projektne vrijednosti parametara toplinske ugodnosti, dosada su se temeljile isključivo na primjeni PMV – PPD modela. Njima su, u skladu s rezultatima laboratorijskih istraživanja, preporučena vrlo uska područja ugodnosti. Rezultati terenskih istraživanja potvrdili su valjanost takva pristupa u klimatiziranim zgradama, u kojima su ljudi razvili visoka očekivanja prema ustaljenosti i jednoličnosti raspodjele temperature zraka, te mogu postati vrlo kritični ukoliko zatečeni toplinski uvjeti ne

ispunjavaju njihova očekivanja. S druge strane, terenska su istraživanja pokazala da ljudi koji žive ili rade u zgradama s prirodnim provjetravanjem, u kojima imaju dovoljnu razinu osobne kontrole nad stanjem okoliša, postaju naviknuti na šarolikost toplinskih uvjeta koji odražavaju lokalne dnevne ili sezonske klimatske promjene. Njihov opažaj stanja prostora, preferencije i snošljivost, protežu se na šire područje temperatura negoli je ono propisano dosadašnjim normama. Ta spoznaja dovela je do uvođenja rezultata modela prilagođavanja u međunarodne norme, s nadom da će njihov pristup, koji se oslanja na promjenjivost unutrašnjih temperatura u ljetnom periodu ovisnu o temperaturama vanjskoga zraka, omogućiti uštede i povećanje energetske učinkovitosti u zgradarstvu.

LITERATURA

- [1] *Energetska učinkovitost u zgradarstvu*, HEP Toplinarstvo d.o.o. i Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, 2007.
- [2] CEN EN15251: *Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings—Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics*, preview, Österreichisches Normungsinstitut, 2007.
- [3] *Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings*, Official Journal of the European Communities, 2003.
- [4] OLESEN, B. W.: *The Philosophy Behind EN15251: Indoor Environmental Criteria for Design and Calculation of Energy Performance of Buildings*, Energy and Buildings 39 (2007), 740–749
- [5] ASHRAE: *Chapter 8: Thermal Comfort*, ASHRAE Handbook—Fundamentals (SI), 2005.
- [6] OLSEN, B. W.; PARSON, K. C.: *Introduction to Thermal Comfort Standards and to the Proposed new version of EN ISO 7730*, Energy and Buildings 34 (2002), 537–548.
- [7] MARKOV, D.: *Standards in Thermal Comfort*, Technical University of Sofia, Bugarska
- [8] BENZINGER, T. H.: *The Physiological Basis for Thermal Comfort*, Indoor Climate, Danish Building Research Institute, Copenhagen, 1979., 441–476.
- [9] KOSONEN, R.; TAN, F.: *Assessment of Productivity Loss in Air-Conditioned Buildings Using PMV Index*, Energy and Buildings 36 (10) (2004), 987–993.

- [10] WYON, D. P.: *The Effects of Indoor Air Quality on Performance and Productivity*, Indoor Air 2004; 14 (Suppl. 7), Blackwell Munksgaard 2004, 92–101.
- [11] WAGNER, A.; GOSSAUER, E.; MOOSMANN, C.; GROPP, Th.; LEONHART, R.: *Thermal Comfort and Workplace Occupant Satisfaction—Results of Field Studies in German Low Energy Office Buildings*, Energy and Buildings 39 (2007), Elsevier B.V., 758–769
- [12] TOFTUM, J.; ANDERSEN, R. V.; JENSEN, K. L.: *Occupant Performance and Building Energy Consumption with Different Philosophies of Determining Acceptable Thermal Conditions*, Building and Environment, doi:10.1016/j.buildenv.2009.02.007
- [13] Indoor Air Facts No. 4: *Sick Building Syndrome*, US Environmental Protection Agency, 1991.
- [14] DE DEAR, R.: *Thermal Comfort in Practice*, Indoor Air 2004; 14 (Suppl. 7), Blackwell Munksgaard 2004, 32–39
- [15] FANGER, P. O.: *Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1972.
- [16] LOOMANS, M. G. L. C.: *The Measurement and Simulation of Indoor Air Flow*, thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 1998.
- [17] JONES, B. W.: *Capabilities and Limitations of Thermal Models for Use in Thermal Comfort Standards*, Energy and Buildings 34 (2002), 653–659
- [18] PREK, M.: *Thermodynamical Analysis of Human Thermal Comfort*, Elsevier Ltd., 2005.
- [19] AWBI, H.B.: *Ventilation of Buildings*, Spon Press, Taylor and Francis Group, London, 2003.
- [20] BRAGER, G. S.; DE DEAR, R. J.: *Thermal Adaptation in the Built Environment: a Literature Review*, Energy and Building 17 (1998), 83–96
- [21] HUMPHREYS, M. A.; NICOL, J. F.: *The Validity of ISO-PMV for Predicting Comfort Votes in Everyday Thermal Environments*, Energy and Buildings 34 (2002), 667–684.
- [22] *Thermal Comfort*, INNOVA Air Tech Instruments A/S, Danska, 1997.
- [23] NICOL, J. F.; HUMPHREYS, M. A.: *Adaptive Thermal Comfort and Sustainable Thermal Standards for Buildings*, Energy and Buildings 34 (2002), 563–572.
- [24] DE DEAR, R.; BRAGER, G.; COOPER, D.: *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference*, final report, ASHRAE RP-884, 1997.
- [25] CENA, K.; DE DEAR, R.: *Field Study of Occupant Comfort and Office Thermal Environments in a Hot-arid Climate*, final report, ASHRAE RP-921, 1998.
- [26] FANGER, P. O.; TOFTUM, J.: *Extension of the PMV Model to Non-air-conditioned Buildings in Warm Climates*, Energy and Buildings 34 (2002), Elsevier Science B.V., 533–536
- [27] DE DEAR, R.; BRAGER, G. S.: *Thermal Comfort in Naturally Ventilated Buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55*, Energy and Buildings 34 (2002), 549 – 561
- [28] NICOL, F.; HUMPHREYS, M.: *Derivation of the Adaptive Equations for Thermal Comfort in Free-running Buildings in European standard EN15251*, Building and Environment (2009), doi:10.1016/j.buildenv.2008.12.013
- [29] MCCARTNEY, K. J.; NICOL, J. F.: *Developing an Adaptive Control Algorithm for Europe*, Energy and Buildings 34 (2002), 623–635